

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Васильченко Александра Анатольевича «Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы исследования. Коллективные явления в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах составляют одну из фундаментальных проблем физики конденсированного состояния. Эта проблема весьма универсальна, поскольку исследователи сталкиваются с ней при изучении многих явлений, в частности, таких как целочисленный и дробный эффект Холла, вигнеровская кристаллизация, переход металл диэлектрик, квантование проводимости, спиновые капли, осцилляции незатухающего тока. Низкоразмерные полупроводниковые структуры являются перспективными при разработке новых функциональных элементов микроэлектроники. Минимизация этих элементов достигает таких размеров, при которых для носителей зарядов они становятся двумерными, одномерными и нульмерными. В связи с этим важно знать закономерности и механизмы влияния взаимодействия носителей заряда, размерных параметров, удерживающих потенциалов, магнитных и электрических полей на свойства таких систем. Исследованию этой проблемы и посвящена диссертационная работа А.А. Васильченко, чем и определяется ее актуальность.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и списка цитированных источников.

Во введении представлены актуальность темы исследований, цель и основные научные задачи работы, научная новизна, обосновывается достоверность результатов, сформулированы положения и основные результаты, выносимые на защиту, приведена информация об апробации работы, личном вкладе автора, о публикациях и приведена структура и краткое содержание диссертации.

В главе 1 приведен краткий обзор о методе теории функционала плотности, точных вычислениях для квантовых точек, приведены результаты экспериментов для ЭДЖ в квантовых ямах Si/SiGe/Si. Также представлены экспериментальные результаты для явлений и эффектов, которые исследуются теоретически в диссертации

В главе 2 с помощью теории функционала плотности изучаются свойства квазидвумерной ЭДЖ. Получены аналитические выражения для энергии ЭДЖ в зависимости от масс электрона и дырки, анизотропии масс и числа эквивалентных долин. Аналитические выражения позволяют оценивать равновесную плотность электронно-дырочных пар в различных полупроводниках.

На основе численных решений уравнений Кона-Шэма подробно исследованы свойства ЭДЖ в Si/SiGe и Si/SiO₂ квантовых ямах. Получено хорошее согласие с экспериментальными результатами. На мой взгляд, особенно интересные результаты получены для Si/SiGe квантовых ям, в которых возможно образование трехкомпонентной ЭДЖ.

Проведены расчеты для ЭДЖ во внешнем электрическом и магнитном полях. Показано, что электрическое поле разрушает ЭДЖ. В магнитном поле равновесная плотность электронно-дырочных пар сильно возрастает с увеличением напряженности магнитного поля.

Важной проблемой является поиск параметров полупроводниковых структур, в которых критическая температура ЭДЖ будет близка к комнатной. Одной из таких структур являются пленки алмаза нанометровой толщины. Найдены условия, при которых в алмазных пленках критическая температура ЭДЖ может быть близка к комнатной.

В главе 3 с помощью теории функционала плотности исследуются электронные свойства двумерных квантовых точек в перпендикулярном магнитном поле. Полученные результаты вычислений дали хорошее согласие с результатами решения многочастичного уравнения Шредингера для квантовых точек с небольшим числом электронов.

На основе численных решений уравнений Кона-Шэма найдены новые серии магических чисел для полного углового момента электронов и объяснена их природа.

Получены интересные результаты для незатухающих токов в квантовых точках и квантовых кольцах. Природа этих осцилляций связана с электрон-электронным взаимодействием. Вычислены амплитуда и период осцилляций незатухающих токов и получена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока.

В главе 4 с помощью теории функционала плотности исследуются электронная структура вертикально-связанных квантовых точек в магнитном поле. Проведено сравнение полученных результатов с точными результатами.

Изучено влияние величина туннельной щели, магнитного поля и числа частиц в двойной квантовой точке на наборы магических чисел для полного углового момента электронов. Для двойных квантовых точек в форме колец найдена зависимость незатухающего тока от магнитного поля для различных значений туннельной щели.

В рамках теории функционала плотности построена количественная теория стабильности квантового холловского состояния (КХС) в системе двух вертикально-связанных квантовых точек. Построена фазовая диаграмма

перехода в режим КХС и показано, что КХС может быть стабильным при нулевой туннельной щели.

В рамках теории функционала плотности вычислена энергия двумерного электронно-дырочного комплекса в магнитном поле в зависимости от расстояния между квантовыми ямами и от числа электронно-дырочных пар. Найдено, что прямые электронно-дырочные комплексы могут содержать большое число электронно-дырочных пар. На основе численных расчетов найдена зависимость незатухающего тока электронов и дырок от магнитного поля.

В главе 5 используется теория функционала плотности для изучения перехода в спин-поляризованное состояние электронов в квантовой проволоке в нулевом магнитном поле и свойств ЭДЖ в квантовой проволоке.

На основе численных решений уравнений Кона-Шэма построена фазовая диаграмма перехода в спин-поляризованное состояние. Показано, что в узкой квантовой проволоке переход в спин-поляризованное состояние переход возможен при достаточно высоких двумерных плотностях электронов. Полученные аналитические оценки для квантовых проволок с различной геометрией дали хорошее согласие с численными результатами.

Для энергии ЭДЖ в квантовой проволоке получено аналитическое выражение. На основе этого выражения вычислена равновесная плотность ЭДЖ, которая хорошо согласуется с экспериментальными результатами для InAs квантовой проволоки.

Научная новизна. Научная новизна положений, результатов и выводов диссертационной работы не вызывает сомнений. В качестве наиболее значимых новых научных результатов необходимо выделить следующие:

- Предсказана многокомпонентная ЭДЖ в квантовых ямах SiGe/Si и в пленках алмаза.

- Найдены условия образования ЭДЖ в пленках алмаза нанометровой толщины при температуре близкой к комнатной.
- Получена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока в квантовых точках и кольцах.
- Впервые в рамках теории функционала плотности показано, что квантовое холловское состояние в двойных квантовых точках при факторе заполнения уровня Ландау, равном единице, является стабильным при нулевой туннельной щели.
- Показано, что в двойных электронно-дырочных квантовых точках в сильном магнитном поле могут образовываться многочастичные электронно-дырочные комплексы.
- Построена фазовая диаграмма перехода в ферромагнитное состояние в квантовой проволоке.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов
 Обоснованность научных положений и выводов основывается на глубоком и критическом анализе многочисленных отечественных и зарубежных публикаций и следующих из него грамотно сформулированных цели и задач исследования. Используемый в работе метод функционала плотности соответствует целям работы и поставленным задачам. Проведенные исследования отвечают современному состоянию физики конденсированных сред. Достоверность научных положений и результатов основана на использовании апробированных методов и подтверждена согласием численных результатов с результатами точных расчетов и экспериментов.

Апробация работы и публикации. По теме диссертационной работы опубликованы в 43 печатных работы, из них 23 работы включены в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, базы данных Web of Science и Scopus. Результаты 20 работ представлены на международных научных конференциях.

Рекомендации по использованию. Результаты диссертационной работы Васильченко А.А. могут представлять интерес для фундаментальных и прикладных научных исследований низкоразмерных структур, проводимых в учреждениях РАН и других научных организациях, а также в ВУЗах при изучении этих структур на спецкурсах.

Замечания по работе

1. Гетеропереход Si/SiGe является гетеропереходом второго рода. Следовало бы детально проанализировать влияние барьера для электронов на характеристики ЭДЖ.
2. Непонятно почему автор провел вычисления для квантовых точек на основе GaAs и не провел расчеты для других полупроводников.
3. На рисунках в главах 2 и 3 приведены разные единицы измерения (например, однотипные рисунки 2.8 и 2.12).

Эти замечания не являются принципиальными и не снижают высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Васильченко Александра Анатольевича «Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах» можно сказать, что она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное значение для физики низкоразмерных структур. Актуальность темы исследования, новизна, обоснованность и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, правильно и полно отражая основное содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Васильченко Александра Анатольевича «Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах» соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. постановления Правительства РФ от 01.10. 2018 г. №1168), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
кафедры общей и теоретической физики
Института математики и естественных наук

21.11.2019г.

подпись
УДОСТОВЕРЯЮ

начальник Управления
делами СКФУ



Логачева А. В.

Дерябин Дерябин Михаил Иванович

355000, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет»

Тел. (8652)330283

E-mail: m.i.deryabin@rambler.ru